

温度・速度の同時測定用デバイスの開発

Development of Device for Simultaneously Measurement of Velocity and Temperature

服部 幸廣（愛知工科短大），伊藤 基之（愛知工科大名誉教授）

Yukihiro HATTORI, Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2 Manori, Nishihasamacho, Gamogori, Aichi, 443-0047, Japan

Motoyuki ITO, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasamacho, Gamogori, Aichi, 443-0047, Japan

Key Words: Hot Wire, Cold Wire, Simultaneously Measurement, Turbulence, Heated Jet, Two-Dimensional Jet, Push-Pull Flow

1. 緒言

著者らのこれまでの研究^{(1)~(5)}では、新しく試作した局所排気装置を用いて、ノズル開口から噴き出す一定温度の2次元噴流とフードにおける吸い込み流れが組み合わさった乱流（プッシュプル流れ）の速度場の特性を、X型熱線を用いた定温度流速計で瞬時速度を測定し実験的に解明してきた。また、有害ガスに見立てた軸対称加熱噴流を鉛直上向きに噴出しプッシュプル流れに衝突・誘引させ、その気流をフードで漏れることなく回収する流れの温度場の特性を、I型冷線を用いた定電流温度計で瞬時温度を測定し、実験的に解明している。しかし、有害ガスに見立てた加熱噴流が、プッシュプル流れに衝突し誘引され拡散していくこのような流れ場では、同一測定位置において瞬時速度および瞬時温度が同時に変動している。したがって、瞬時速度と瞬時温度を同時に測定し、温度と速度の高次統計量を実験的に求めることは、局所排気装置の流れ場を解明するうえで極めて重要である。

瞬時速度と瞬時温度を同時計測するために、熱慣性の小さい極細冷線（ $\phi 0.63\mu\text{m}$ の白金線）と熱線（ $\phi 5\mu\text{m}$ のタンゲステン線）を用い、それらを相互干渉しない範囲⁽⁶⁾で極力接近させ、測定の空間分解能を上げるとともに、熱線からの出力信号は、温度補償および流れの上流にある冷線と下流にある熱線の距離に応じた時間補償をする必要があるが、本研究では冷線と熱線の距離を0.7mmまで接近させたので、時間補償は行わず今後の課題とした。本報では開発した速度・温度の同時測定用デバイスとその特性について報告する。

2. 温度・速度同時測定用プローブ

2-1 全体の構成

I型冷線とX型熱線を使用して、温度・速度を同時測定するためには、冷線用プローブと熱線用プローブを組み合わせ、更に両線間距離や位置関係を調整できる機構が必要となる。図1に作製した温度・速度同時測定用デバイスを示す。このデバイスは3個のマイクロステージを組み合わせ、熱線用と冷線用プローブの相互の位置関係を3軸（X,Y,Z）方向に微動調整できるものである。

2-2 温度測定部

温度測定用冷線には、ウォラストン線をエッチング⁽⁷⁾して得た $\phi 0.63\mu\text{m}$ の白金線を使用した。図3(a),(b)は田川ら⁽⁸⁾の報告している計算方法に基づいて、 $\phi 0.63\mu\text{m}$ の白金冷線と $\phi 5\mu\text{m}$ のタンゲステン冷線の温度変動に対する周波数応答特性を表わしたボード線図である。 $\phi 0.63\mu\text{m}$ の冷線は、 $\phi 5\mu\text{m}$ の冷線に比べ格段に応答性の良さを示し、周波数1kHz程度までゲインと位相についての補償をしなくてもよいと判断した。

2-3 速度測定部

熱線流速計の出力電圧 (E_a, E_b) と風速 (U_a, U_b) の関係

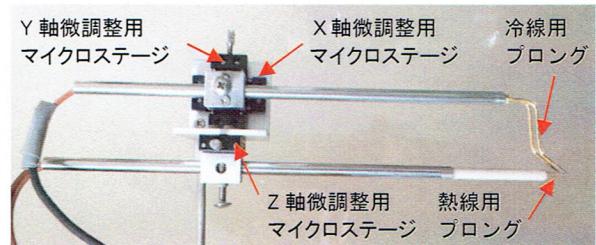


Fig.1 Measurement device.

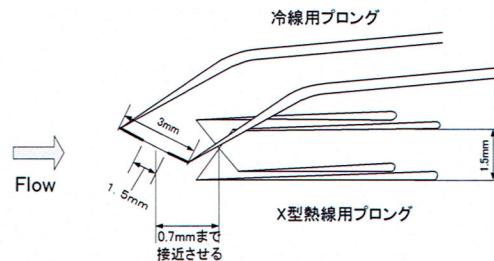


Fig.2 Layout of hot wires and a cold wire.

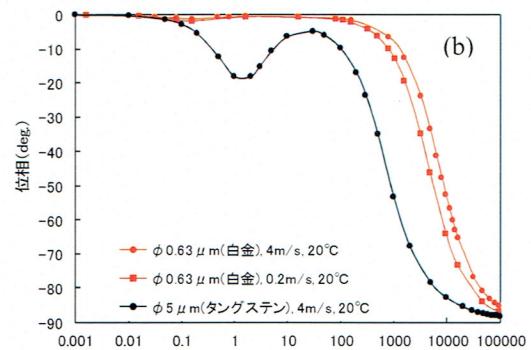
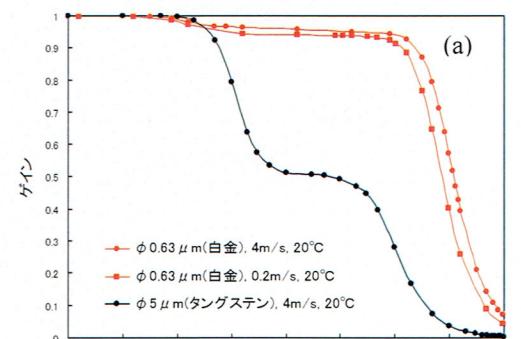


Fig.3(a)(b) Board diagram of cold wires.

には、気流の温度依存性があるため、温度が異なる気流の速度を求めるためには温度補償が必要である。本研究では藤田らの方法⁽⁹⁾を参考にした。藤田によれば、定温度型熱線流速計の出力電圧 E と流速 U の関係は式(1)で表される。

$$U = K_c \left\{ \frac{(1+K_B\theta_r) + K_B\Delta\theta}{(1-K_A\theta_r) - K_A\Delta\theta} E^2 - [(1+K_B\theta_r) + K_B\Delta\theta] K_D \right\}^{2.22} \quad (1)$$

式(1)中の K_A , K_B , K_C , K_D は次のような定数である。

$$K_A = \frac{1}{\theta_w}, \quad K_B = \frac{1}{\theta_w + K_3}$$

ここに、 $\Delta\theta = \theta_a - \theta_r$, U : 流速, E : 出力電圧, θ_w : 热線の温度, θ_a : 気流温度, θ_r : 室温である。

したがって、定数 K_A , K_B , K_C , K_D が求まれば、室温が θ_r , 気流温度が θ_a における温度補償された流速 U が得られる。定数 K_A , K_B , K_C , K_D の算出手順は次のとおりである。

① K_A の算出

$K_A = \frac{1}{\theta_w}$ であるので、熱線温度 θ_w から K_A を算出できる。使用したカノマックス社製の定温度熱線流速計(CTA1011)では熱線の加熱比 α を式(2)のように定義している。

$$\alpha = \frac{R}{R_a} = \frac{\text{計測時における熱線の電気抵抗値}}{\text{室温における熱線の電気抵抗値}} = \frac{R_0 \{1 + \beta(\theta_w - \theta_0)\}}{R_0 \{1 + \beta(\theta_r - \theta_0)\}} \quad (2)$$

従って、式(2)により熱線の温度 θ_w は式(3)で求めることができる。

$$\theta_w = \frac{\alpha \{1 + \beta(\theta_r - \theta_0)\} - 1}{\beta} + \theta_0 \quad (3)$$

使用したカノマックス社製の定温度熱線風速計(CTA1011)では、加熱比 α が 1.5 となるように熱線の温度 θ_w が制御されているので、 $\alpha=1.5$ である。また、 $\theta_0=0(^{\circ}\text{C})$ であるので、式(3)は式(4)となる。

$$\theta_w = \frac{1.5(1 + \beta\theta_r) - 1}{\beta} = \frac{1.5\beta\theta_r + 0.5}{\beta} \quad (4)$$

式(4)に、使用した熱線の温度係数 $\beta=3.65 \times 10^{-3}$, および室温 θ_r の値を代入して K_A を求める。

② K_B の算出

$K_B = \frac{1}{\theta_w + K_3}$ であるので、ここに、 $K_3=718$, θ_w の値を代入して K_B を求める。

③ K_C より K_D の算出

K_C より K_D を算出するためには、式(1)を次式のように変形する。

$$U = K_c \{C_1 E^2 - C_2 K_D\}^{2.22} \quad (5)$$

ここで、 C_1 より C_2 は以下のようないきなりであり、実験条件により算出される定数である。

$$C_1 = \frac{(1+K_B\theta_r) + K_B\Delta\theta}{(1-K_A\theta_r) - K_A\Delta\theta}$$

$$C_2 = [(1+K_B\theta_r) + K_B\Delta\theta]$$

また、式(5)を変形して式(6)を得る。

$$U^{0.45} = K_c^{0.45} (C_1 E^2 - C_2 K_D) = K_c^{0.45} C_1 E^2 - K_c^{0.45} C_2 K_D \quad (6)$$

式(6)は $U^{0.45}$ が E^2 の一次式であることを示している。従って、式(6)の勾配 $A (= K_c^{0.45} C_1)$ と切片 $B (= -K_c^{0.45} C_2 K_D)$ が分かれば、 K_c および K_D は、次式で算出することができる。

$$K_c = \left(\frac{A}{C_1} \right)^{2.22} \quad K_D = -\frac{B}{K_c^{0.45} \cdot C_2}$$

勾配 A より切片 B の値は、室温 θ_r および気流温度 θ_a が、それぞれ、ある一定値のもとで、流速 U を変化させたときの出力電圧 E の値を計測することにより求めることができる。

図4は、室温 θ_r が一定値のもとで、 E^2 と $U^{0.45}$ の関係を種々の気流温度 θ_a について測定するために設計製作した加熱噴流発生装置である。図示していないが、加熱噴流発生装置の上流にはインバーターモーターを内蔵したリングプロアーガーが取り付けられており、加熱噴流発生装置に流入する体積流量を調整した後、加熱噴流発生装置の下部から流入させる。流入した気流は金網、整流格子およびパンチングメタルにより整流され、ノズル先端から噴出する。噴き出し温度は加熱用コイルの消費電力を調整して設定する。また、ノズルからの噴き出し速度 U_j は、リングプロアーア吸入口に取り付けた入り口ノズル⁽¹⁰⁾を用いて測定した体積流量を噴き出し温度 T_j における体積流量に換算し、その値をノズルの断面積で除して求めた。

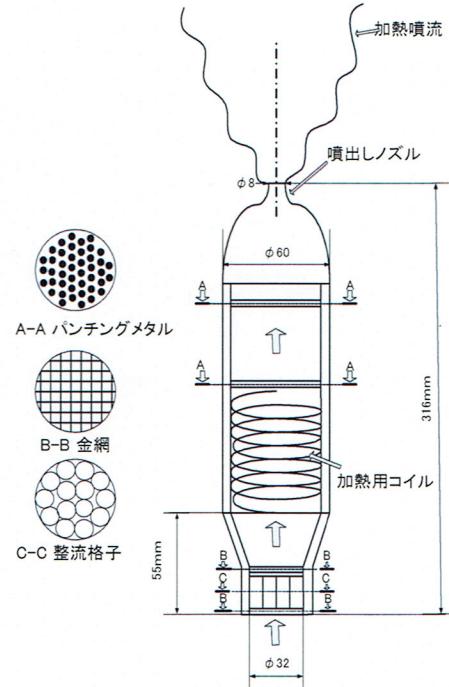


Fig.4 Heated jet generator.

図5に E^2 と $U^{0.45}$ の関係を示した。各気流温度での測定結果を、それぞれ一次式で回帰して勾配 A と切片 B を求めて算出した K_c , K_D と $\Delta\theta (= \theta_a - \theta_r)$ の関係を図6, 図7に示す。 K_c , K_D の値は温度に依存しないほぼ一定の値であることがわかる。従って、本研究では $\Delta\theta = 0^{\circ}\text{C}$ ($\theta_a = \theta_r$)における $K_c = 0.251$, $K_D = 4.35$ を用いて速度の温度補償を行った。このようにして補償した風速の計測値と既知の風速の関係を図8に示す。補償精度は充分とは言えない。今後一層の精度向上を図りたい。

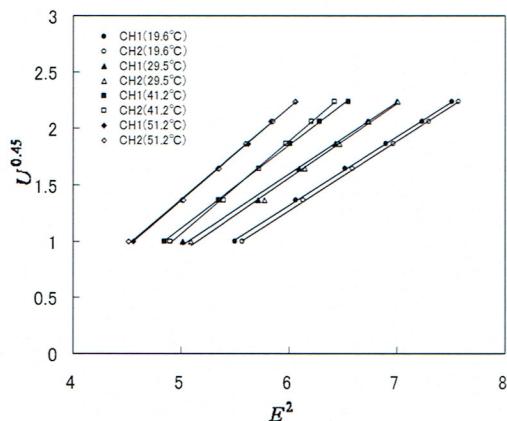


Fig.5 Relationship between E^2 and $U^{0.45}$.

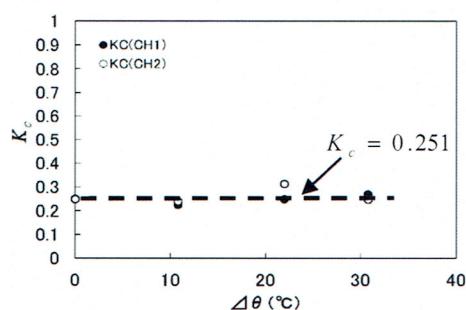


Fig.6 Calculated value of K_c .

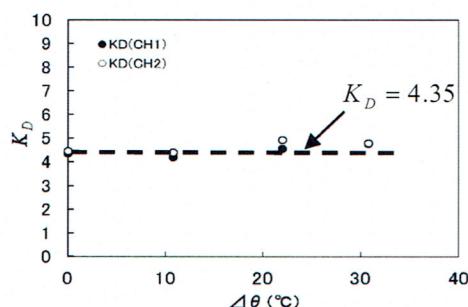


Fig.7 Calculated value of K_D .

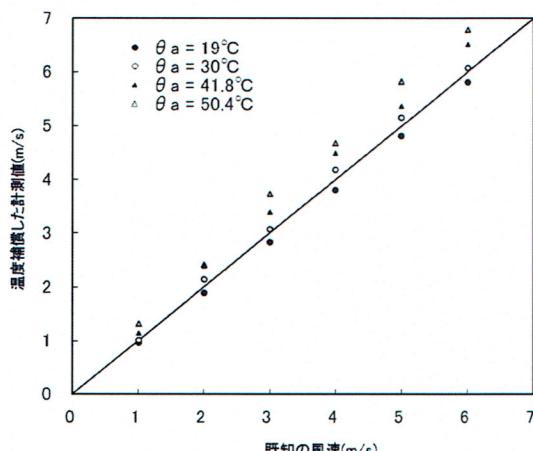


Fig.8 Relationship between compensated value and correct value.

3. 結言

瞬時温度・瞬時速度を同時測定できるデバイスを作製し、その特性を定量的に評価した。測定精度は充分とは言えないため、今後は冷線と熱線の距離に応じた時間補償をすることで改善していきたい。

参考文献

- (1) 中林功一, 服部幸廣: 「プッシュブル完全局排方式に関する基礎研究(第1報:漏れ限界流量比とプッシュブル流れの特性)」日本機械学会論文集(B編) 75巻 753号 pp.1076-1083 (2009.5)
- (2) 服部幸廣, 中林功一, 鬼頭修巳, 伊藤基之: 「プッシュブル完全局排方式に関する基礎研究(第2報:プッシュブル流れの流れ特性)」日本機械学会論文集(B編) 76巻 772号 pp.2002-2010 (2010.2)
- (3) 服部幸廣, 中林功一, 鬼頭修巳, 伊藤基之: 「プッシュブル完全局排方式に関する基礎研究(第3報:流れ特性に及ぼすノズル・フード間距離の影響)」日本機械学会論文集(B編) 77巻 776号 pp.1054-1063 (2011.4)
- (4) 服部幸廣, 伊藤基之, 「プッシュブル局排方式に関する基礎研究(第4報:破断限界流量比とブルームの拡散特性)」, 日本機械学会九州支部第65期講演論文集(2012.3), No.128-1, pp.57-58.
- (5) 服部幸廣, 伊藤基之: 「水平なプッシュブル流れに上昇する軸対称浮力噴流が誘引される流れ場の温度特性」日本機械学会中国四国支部第51期講演論文集, No.135-1, (2013.3)
- (6) 菅原幹雄: 「変動する速度と温度の同時測定」日本機械学会誌 80巻 700号 pp.247-252 (1976)
- (7) A.E .Perry, : "Hot-wire Anemometry", Clarendon Press Oxford, pp.7-9, (1982)
- (8) 田川正人, 加藤健次, 太田安彦: 「細線温度センサの応答特性と応答補償」日本機械学会論文集(B編) 71巻 706号 pp.1663-1670 (2005.6)
- (9) 藤田秀治, 森重樹, 澤田耕二: 「温度流速計の高精度化」日本機械学会論文集(B編)58巻 545号 pp.90-97 (1992.1)
- (10) 板谷松樹, 竹中俊夫: 「入口ノズルによる流量測定」日本機械学会論文集 23巻 129号 pp.319-322 (1957.5)